

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт
з курсу «Контактно-дугогасні системи та теплові процеси
в електричних апаратах»
для студентів спеціальності
141 “Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка”
спеціалізацій 141.07 “Електричні апарати” та
141.08 “Електропобутова техніка” усіх форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 25. 05. 2018 р.

Харків
НТУ «ХП»
2018

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Контактно-дугогасні системи та теплові процеси в електричних апаратах» спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка” спеціалізацій 141.07 “Електричні апарати” та 141.08 “Електропобутова техніка” усіх форм навчання / уклад. Ю. С. Грищук. – Харків : НТУ «ХП», 2018. – 24 с.

Укладач Ю. С. Грищук

Рецензент М. Г. Пантелят

Кафедра електричних апаратів

ВСТУП

В струмопровідних, ізолюючих і конструктивних деталях електричних апаратів виникають втрати електричної енергії у вигляді тепла. В загальному випадку теплова енергія частково витрачається на підвищення температури апарата і частково розсіюється у навколишнє середовище.

При підвищенні температури відбувається прискорене старіння ізоляції провідників і зменшується їх механічна міцність. Наприклад, термін служби ізоляції, при зростанні тривалої температури усього на вісім градусів Цельсія вище номінальної, скорочується у два рази.

При збільшенні температури від $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ механічна міцність міді знижується на 40 процентів. Ці процеси ускладнюються тим, що при короткому замиканні, коли температура може становити $200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$, на струмопровідні деталі впливають великі електродинамічні зусилля. Стабільна робота контактних з'єднань також залежить від температури.

Нагрів струмопровідних частин і ізоляції апарата значною мірою визначає його надійність. Тому у всіх можливих режимах роботи їх температура не повинна перевищувати тих значень, при яких забезпечується задана тривалість роботи апарата.

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт дають можливість глибше вивчити характер теплових процесів, які мають місце при роботі електричних апаратів, а саме: розрахувати і дослідити вплив геометричних, питомих фізичних, теплових і електричних, параметрів провідників та частоти струму на коефіцієнт поверхневого ефекту, температуру матеріала та на втрати потужності при змінному і постійному струмах; проаналізувати вплив величини струму на переріз і діаметр круглих провідників в тривалому режимі, з урахуванням впливу температури на питомий опір; дослідити швидкість розповсюдження теплової хвилі в провідниках, виконаних з різних матеріалів.

1. Лабораторна робота 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТОТИ МЕРЕЖІ НА КОЕФІЦІЄНТ ПОВЕРХНЕВОГО ЕФЕКТУ І ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ

Мета роботи – дослідити вплив частоти мережі на коефіцієнт поверхневого ефекту і втрати потужності алюмінієвого провідника круглого перерізу

1.1 Порядок підготовки до роботи

Вивчити:

- рекомендовану викладачем літературу [1,2];
- методичні вказівки до виконання лабораторної роботи.

1.2 Основні відомості

В електричних апаратах постійного струму нагрів відбувається тільки за рахунок втрат в активному опорі струмоведучого ланцюга.

Активний опір провідника можна визначити за формулою

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.1)$$

де R – активний опір провідника, Ом; ρ – питомий опір провідника, Ом·м;

l – довжина провідника, м; S – площа перерізу провідника, м²;

Питомий опір провідника залежить від його температури і визначається як

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta), \quad (1.2)$$

де ρ_0 – питомий опір матеріалу провідника при 0°C, Ом·м;

α – температурний коефіцієнт питомого опору, 1 / °C;

ϑ – перевищення температури провідника відносно 0 °C.

При змінному струмі активний опір провідника відрізняється від опору на постійному струмі із-за поверхневого ефекту і ефекту близькості [1, 2]. Опір провідника на змінному струмі визначається рівнянням

$$R_{зм} = R_n \cdot \kappa_{\partial}, \quad (1.3)$$

де $R_{зм}$ – опір провідника на змінному струмі;

R_n – опір провідника на постійному струмі;

κ_{∂} – коефіцієнт додаткових втрат.

Коефіцієнт додаткових втрат, що враховує поверхневий ефект і ефект близькості, визначається як

$$\kappa_{\partial} = k_n \cdot k_{\partial}, \quad (1.4)$$

де k_n – коефіцієнт поверхневого ефекту;

k_{∂} – коефіцієнт близькості.

Втрати потужності на постійному струмі P_n дорівнюють:

$$P_n = I^2 \cdot R_n, \quad (1.5)$$

де I – струм, А;

R_n – опір провідника при постійному струмі, Ом.

Втрати потужності на змінному струмі $P_{зм}$ дорівнюють:

$$P_{зм} = I^2 \cdot R_{зм} \cdot \kappa_{\partial}, \quad (1.6)$$

Аргумент для визначення k_n , $x = \sqrt{\frac{f}{R_{100}}}$,

де f – частота змінного струму, Гц;

R_{100} – опір провідника довжиною 100 метрів при постійному струмі, Ом.

$$\begin{aligned} \text{При } x \leq 60 \quad k_n &= 1; \quad 60 < x \leq 130 \quad k_n = 1 + 0,18 \cdot ((x - 60) / 100)^2; \\ x > 130 \quad k_n &= 0,185 \cdot (x / 100)^2 - 0,229x / 100 + 1,073. \end{aligned} \quad (1.7)$$

1.3 Завдання і дані для виконання лабораторної роботи

Завдання 1. Розрахувати коефіцієнт поверхневого ефекту і втрати потужності в залежності від частоти мережі.

Вихідні дані і варіанти завдань (табл.1.1) наведені нижче.

$$\vartheta = 95 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \alpha = 0,00425 \text{ } 1/^\circ\text{C}; \quad \rho_0 = 2,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$I = 200 \text{ А.}$$

Таблиця 1.1– Варіанти завдань

№ варіанту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_n , мм	78	80	90	100	110	120	130	140	150	160
f , Гц	400- 1200	600- 1400	800- 1600	1000- 1800	1200- 2000	1400- 2200	1600- 2400	1800- 2600	2000- 2800	2200- 3000
№ варіанту	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
d_n , мм	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260
f , Гц	2400- 3200	2600- 3400	2800- 3600	3000- 3800	3200- 4000	3400- 4200	3600- 4400	3800- 4600	4000- 4800	4200- 5000

1.4 Зміст звіту

В звіті до лабораторної роботи необхідно навести мету роботи, розрахункові залежності та одержані результати в вигляді таблиць або графіків.

Контрольні запитання

1. Як визначити коефіцієнт додаткових втрат ?
2. Як визначається потужність на постійному та змінному струмі ?
3. Фізична сутність коефіцієнту поверхневого ефекту.
4. Визначення коефіцієнту близькості.
5. Проаналізувати вплив діаметра провідника на коефіцієнт додаткових втрат і на втрати потужності на постійному та змінному струмах.
6. Визначити і проаналізувати вплив частоти мережі на коефіцієнт додаткових втрат та втрати потужності.

2. Лабораторна робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІЗНИЦІ ДІАМЕТРІВ ПОЛИХ ПРОВІДНИКІВ І ЧАСТОТИ МЕРЕЖІ НА КОЕФІЦІЄНТ ПОВЕРХНЕВОГО ЕФЕКТУ

Мета роботи – дослідити вплив різниці діаметрів полих провідників і частоти мережі на коефіцієнт поверхневого ефекту.

2.1 Порядок підготовки до роботи

Вивчити:

- рекомендовану літературу [1, 2];
- методичні вказівки до виконання лабораторної роботи.

2.2 Основні відомості

Як відомо з [1,2], чим більше частота струму і чим менше питомий опір провідника тим більше поверхневий ефект. Суттєву роль відіграють і розміри провідника: чим більше його діаметр, тим більше поверхневий ефект. Це пояснюється тим що змінний струм, який тече по провіднику, створює змінне магнітне поле, яке, перетинаючи тіло провідника, наводить в ньому електрорушійну силу (ЕРС). Ця ЕРС створює вихрові струми, які геометрично складаються з основним змінним струмом. Внаслідок найбільша щільність струму спостерігається на поверхні провідника. Пересуваючись до центру щільність струму швидко спадає.

Через поверхневий ефект внутрішня частина провідників не обтікається струмом і фактично не використовується. З цієї причини використовують провідники трубчастого або коробчастого перерізу.

Опір провідника R легко знайти, знаючи його матеріал, довжину, переріз і питомий опір ρ , коефіцієнт поверхневого ефекту k_n . Коефіцієнт близькості k_δ можна прийняти рівним одиниці

$$\text{Аргумент для визначення } k_n, \quad x = \sqrt{f / R_{100}},$$

де f – частота змінного струму, Гц;

R_{100} – опір провідника довжиною 100 метрів при постійному струмі, Ом.

При $x \leq 60$, $k_n = 1$; $60 < x \leq 130$ $k_n = 1 + 0,18 \cdot ((x - 60) / 100)^2$;

$x > 130$ $k_n = 0,185 \cdot (x / 100)^2 - 0,229x / 100 + 1,073$.

2.3 Завдання і дані для виконання лабораторної роботи

Завдання 1. Розрахувати і дослідити вплив різниці діаметрів полів провідників і частоти мережі на коефіцієнт поверхневого ефекту.

Вихідні дані і варіанти завдань (табл.2.1) наведені нижче.

$$\vartheta = 95 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \alpha = 0,00425 \text{ } 1/^\circ\text{C}; \quad \rho_0 = 2,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$I = 200 \text{ А.}$$

Таблиця 2.1– Варіанти завдань

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_3 , мм	78	80	90	100	110	120	130	140	150	160
$d_в$, мм	74	78	82	84	88	92	98	104	112	116
f , Гц	400- 1200	600- 1400	800- 1600	1000- 1800	1200- 2000	1400- 2200	1600- 2400	1800- 2600	200- 2800	2200- 3000
№ вар.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
d_3 , мм	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260
$d_в$, мм	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260
f , Гц	2400 - 3200	2600 - 3400	2800 - 3600	3000 - 3800	3200 - 4000	3400 - 4200	3600 - 4400	3800 - 4600	4000 - 4800	4200 - 5000

2.3 Зміст звіту

В звіті до лабораторної роботи необхідно навести мету роботи, розрахункові залежності та одержані результати в вигляді графіків або таблиць і їх аналіз;

Контрольні запитання

1. Як визначити коефіцієнт додаткових втрат для трубчастих провідників ?
2. Як визначається потужність на постійному та змінному струмі для провідників трубчастого та коробчастого перерізу ?
3. Визначити вплив питомого опору провідника на втрати потужності.
4. Проаналізувати вплив різниці діаметрів трубчастого провідника на коефіцієнт поверхневого ефекту.
5. Визначити вплив частоти мережі на додаткові втрати потужності.
6. Визначити вплив частоти мережі на коефіцієнт додаткових втрат.
7. Як впливає питомий опір провідника на втрати потужності ?

3. Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ПИТОМИЙ ОПІР ПРОВІДНИКА

Мета роботи – дослідити вплив температури на питомий опір мідних і алюмінієвих провідників.

3.1 Порядок підготовки до роботи

Вивчити:

- рекомендовану викладачем літературу [1,2];
- методичні вказівки до виконання лабораторної роботи.

3.2 Основні відомості

При проходженні струму по провіднику останній має деякий опір. Цей опір буде тим більше, чим довше провідник, чим він тонше, і чим гірше даний матеріал проводить струм, тобто чим більше питомий опір. В свою чергу температура також впливає на опір провідника.

Тому за одиницю опору маємо обрати опір провідника, зробленого з певного матеріалу, що має певну довжину, визначену площу поперечного перерізу і температуру.

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta),$$

де ρ_0 – питомий опір матеріалу провідника при 0 °С, Ом·м;

α – температурний коефіцієнт питомого опору, 1/°С;

$\vartheta = (\Theta - \Theta_0)$ – перевищення температури провідника відносно 0 °С;

Θ_0 – температура провідника рівна, 0 °С;

Θ – температура провідника, °С.

3.2 Завдання і дані для виконання лабораторної роботи

Завдання 1. Розрахувати, і проаналізувати вплив температури Θ на питомий опір мідних і алюмінієвих провідників і на втрати потужності при постійному і змінному струмах. Вихідні дані і варіанти завдань (табл.3.1) наведені нижче.

Діаметр провідника, $d = 0,125$ мм ; частота струму, $f = 2200$ Гц.

Для міді: $\rho_0 = 1,58 \cdot 10^{-8}$, Ом·м; $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3}$, 1 / °С.

Для алюмінію: $\rho_0 = 2,62 \cdot 10^{-8}$, Ом·м; $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3}$, 1 / °С.

Таблиця 3.1–Варіанти даних

№вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Θ , °С	100	200	300	400	500	1000	1500	1700	1900	2000
№вар.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Θ , °С	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000

3.4 Зміст звіту

В звіті необхідно навести мету роботи, розрахункові залежності, одержані результати в вигляді графіків або таблиць і їх аналіз;

Контрольні запитання

1. Як визначити коефіцієнт додаткових втрат і потужність на постійному та змінному струмах ?
2. Коефіцієнт поверхневого ефекту і його вплив на нагрів провідника.
3. Коефіцієнт близькості і його вплив на втрати потужності.
4. Проаналізуйте вплив діаметра трубчастого провідника на коефіцієнт додаткових втрат .
5. Вплив частоти мережі на коефіцієнт додаткових втрат та втрати потужності.
6. Як впливає температура на опір провідника і на коефіцієнт додаткових втрат при різних матеріалах провідників?

4. Лабораторна робота 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУМУ НА ВЕЛИЧИНУ ДІАМЕТРА НЕІЗОЛЬОВАНОГО ПРОВІДНИКА

Мета роботи – дослідити вплив струму на діаметр неізованих мідного та алюмінієвого провідників.

4.1 Порядок підготовки до роботи

Вивчити:

- рекомендовану викладачем літературу [1, 2];
- методичні вказівки до виконання лабораторної роботи.

4.2 Основні відомості

Згідно рівняння теплового балансу кількість виділеного тепла повинна дорівнювати кількості відведеного тепла:

$$I^2 \cdot R \cdot k_{\partial} = K_m \cdot (\theta - \theta_{nc}) F_{охл}.$$

Опір круглого мідного провідника:

$$R = \frac{4\rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta) \cdot l}{\pi \cdot d^2},$$

де ρ_0 – питомий електричний опір при 0°C , Ом·м;

d – діаметр провідника, мм; l – довжина провідника, м;

α – температурний коефіцієнт питомого опору відповідного матеріалу провідника, $1/^\circ\text{C}$; θ_n – допустима температура провідника у номінальному режимі, $^\circ\text{C}$, θ_{nc} – температура навколишнього середовища, $^\circ\text{C}$.

Необхідно розрахувати діаметр провідника d в залежності

від струму I

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot I^2 \cdot \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta) \cdot k_{\partial}}{\pi^2 \cdot K_T \cdot (\theta - \theta_{nc})}}.$$

4.3 Завдання і дані для виконання лабораторної роботи .

Завдання . Згідно з варіантами завдання розрахувати діаметр d мідних і алюмінієвих провідників в залежності від струму .

Вихідні дані і варіанти завдань (табл. 4.1) наведені нижче.

Таблиця 4.1– Варіанти даних

№ варіанту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I \cdot 10, \text{A}$	5	10	15	20	30	40	50	60	80	100

Продовження таблиці 4.1

№ варіанту	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$I \cdot 10, \text{ A}$	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200

Таблиця 4.2 – Допустима температура у номінальному режимі, $\Theta_{\text{ном}}$, питомий електричний опір, ρ_0 та температурний коефіцієнт питомого опору, α відповідного матеріалу провідника.

$K_m = 10 \text{ Вт / м}^2$; $\Theta_{\text{ном}} = 105 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $K_\delta = 2,5$;	Для міді:	Для алюмінію:
	$\rho_0 = 1,58 \cdot 10^{-8}, \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3}, 1 / ^\circ\text{C}$;	$\rho_0 = 2,62 \cdot 10^{-8}, \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3}, 1 / ^\circ\text{C}$;

4.4 Зміст звіту

В звіті необхідно навести мету роботи, розрахункові залежності, одержані результати в вигляді графіків або таблиць і їх аналіз;

Контрольні запитання

1. Наведіть рівняння теплового балансу. Поясніть його ліву і праву частину та значення коефіцієнта тепловіддачі.
2. Проаналізувати результати розрахунків впливу величини струму на діаметр провідника при різних матеріалах.
3. Наведіть визначення коефіцієнта додаткових втрат.
4. Наведіть чинники, що впливають на коефіцієнт тепловіддачі.

5. Лабораторна робота 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ХВИЛІ В ПРОВІДНИКАХ, ВИКОНАНИХ З РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи – дослідити вплив поширення теплової хвилі у провідниках виконаних з різних матеріалів (алюміній, мідь, срібло).

5.1 Порядок підготовки до роботи

Вивчити рекомендовану викладачем літературу [1,2] та методичні вказівки до виконання лабораторної роботи.

5.2 Основні відомості

Коефіцієнт температуропровідності a визначають, як

$$a = \sqrt{\lambda / \gamma c} \quad ,$$

де λ – теплопровідність, Вт/см · °С; γ – питома вага, кг / м³;

c – питома теплоємність, Дж / кг · °С.

При побудові залежності $f(t)$, $= 2a\sqrt{t}$ доцільно брати не менш ніж 5 точок.

5.3 Завдання і дані для виконання роботи

Завдання. Розрахувати і дослідити швидкість поширення теплової хвилі у провідниках з різних матеріалів (алюміній, мідь, срібло).

Вихідні дані наведені нижче в (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Дані теплопровідності, питомої теплоємності і
питомої ваги для алюмінію, срібла і міді

Алюміній	Срібло	Мідь
$\lambda = 0,21, \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C};$ $c = 0,95, \text{ Дж/г} \cdot ^\circ\text{C};$ $\gamma = 2,7, \text{ г/м}^3.$	$\lambda = 0,41, \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C};$ $c = 0,234, \text{ Дж/г} \cdot ^\circ\text{C};$ $\gamma = 10,5, \text{ г/м}^3.$	$\lambda = 0,385, \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C};$ $c = 0,39, \text{ Дж/г} \cdot ^\circ\text{C};$ $\gamma = 8,96, \text{ г/м}^3.$

5.4 Зміст звіту

В звіті до лабораторної роботи необхідно навести мету роботи, розрахункові залежності та одержані результати в вигляді графіків або таблиць, їх аналіз та висновки.

Контрольні запитання

1. Приведіть характеристику питомих параметрів:
теплопровідності, питомої теплоємності, питомої ваги та вкажіть їх фізичний зміст і одиниці виміру.
2. Проаналізуйте коефіцієнт температуропровідності і результати розрахунків довжини розповсюдження теплової хвилі за час t для різних матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Залесский А. М., Тепловые расчеты электрических аппаратов /А. М. Залесский, Г. А. Кукеков – Л. : Энергия, 1967, 212 с.
2. Сахаров П. В. Проектирование электрических аппаратов / П.В. Сахаров. – М. : Энергия, 1971, 462 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Приклади програм розрахунку завдань лабораторних робіт у
програмному пакеті MAPLE

А1. Визначення коефіцієнта поверхневого ефекту

Текст програми:

```
> restart;
> alpha[0]:=0.00424; rho[0]:=1.58*10^(-8); l:=200; f:=50; theta:=100;
d:=60.*10^(-3);
Активний опір на змінному струмі струмопровідних елементів
суцільного перерізу> with(plots):
> readlib(spline):
> X:=[0,20,40,60,80,100,120,140,160,180,200,220,240,260,280,300];
> Y:=[1,1.01,1.02,1.03,1.04,1.07,1.1,1.17,1.23,
1.32,1.41,1.52,1.63,1.75,1.88,2];
> k[n]:=spline(X,Y,x):
> a:=plot(k[n](x),x=0..300,labels=["sqrt(f/R)", "kn"],view=[0..300,1..2]):
> display(a);
> rho:=rho[0]*(1+alpha[0]*theta);
> S:=evalf(Pi*d^2/4);
> R[100]:=rho*100/S;
> R[nocm]:=rho*l/S;
> x:=sqrt(f/R[100]);
> k[n](x);
> R[nep]:=k[n]*rho*l/S;
```

А2. Розрахунок температури нагріву неізольованого провідника

Текст програми:

Приклад розрахунку для першого варіанту $n = 1$ > restart;

```
> n:=1:
> Theta[n][1]:=5:
> N:=100:
```

```

> d:=(10+n)*10.^(-3); Tok:=(350+2*n); f:=400; epsilon:=0.9;
upsilon[oc]:=40; C[0]:=5.67:
> rho[0]:=1.62*10^(-8); alpha[0]:=0.0043:
> S[ΠOT]:=evalf(Pi*d^2/4);
> Π:=evalf(Pi*d); S[бок]:=Π*l;
> for i from 1 to N do
  Digits:=5:
  rho[_][i]:=rho[0]*(1+alpha[0]*(upsilon[oc]+Theta[н][i]));
  P[ΠOT][i]:=Tok^2*rho[_][i]*l/S[ΠOT];
  h[k][i]:=1.28*surd(Theta[н][i]/d, 4);
  h[u][i]:=C[0]*epsilon/Theta[н][i]*(((upsilon[oc]+Theta[н][i]+273)/100)^4-
((upsilon[oc]+273)/100)^4);
  h[Theta[н][i]]:=h[k][i]+h[u][i];
  Digits:=5;
  Theta[k][i]:=P[ΠOT][i]/(h[Theta[н][i]]*S[бок]);
  Theta[н][i+1]:=(Theta[н][i]+Theta[k][i])/2;
  K:=abs(Theta[k][i]-Theta[н][i]);if (K < 0.001) then break fi; b:=i+1; end
do:

> Theta:=Theta[k][15];
> theta[ycm]:=upsilon[oc]+Theta;

```

А3. Визначення питомого опору провідників

Текст програми:

```

> restart;

> upsilon:=[100,300];
> alpha:=[0.00424,0.00387,0.0055,0.004,0.004];
> beta:=[0.453,1.1,9.,0.4,0.4]*10^(-6);
> rho[0]:=[1.55,2.62,12.0,1.5,3.3]*10^(-8);
> for i from 1 to 5 do
  for j from 1 to 2 do
    rho[m][i][j]:=rho[0][i]*(1+alpha[i]*upsilon[j]+beta[i]*upsilon[j]^2);
    rho[n][i][j]:=rho[0][i]*(1+alpha[i]*upsilon[j]); Delta[i][j]:=(rho[m][i][j]-
rho[n][i][j])/rho[n][i][j]*100;
    rho[i,j][n]=rho[n][i][j], Delta[i,j]=Delta[i][j];
  od:
od:

```

A4. Дослідження розповсюдження теплової хвилі в провідниках з різних матеріалів

Текст програми:

```
> restart;  
Контактні матеріали : алюміній, мідь, срібло  
> lambda:=[0.95,0.39,0.234];  
> C:=[0.210,0.386,0.41];  
> gamma1:=[2.7,8.96,10.5];  
> for k from 1 to 3 do  
  a[k]:=sqrt(lambda[k]/(C[k]*gamma1[k]));  
  f[k]:=unapply(2*a[k]*sqrt(t),t);  
od;  
  > plot([f[1],f[2],f[3]]),0..3e-3,thickness=3,labels=[`t`,`2*a*sqrt(t)`],label  
font=[TIMES,BOLDITALIC,14]);
```

ДОДАТОК Б

Питома вага, питомий опір, теплопровідність, теплоємність, температура
плавлення різних матеріалів

Матеріал	Питом а вага γ , Г/см ²	Питоми й опір при 0 ° ρ , мкОм·см	Теплопровід -ність при 0° λ , Вт/(см·°C)	Теплоємніст ь с, Дж/(Г·°C)	Температур а плавлення, °C
алюміній	2,70	2,62	2,10	0,95	660
бронза оловяниста	8,7	14-16	0,64	0,36	900-950
вольфрам	19,3	5,1	1,7	0,14	3410
графіт	1,7-1,8	5,1	1,7	0,65-0,85	-
дюралюміні й	2,75	3,3	1,6	0,93	650
залізо	7,9	9-10	0,795	0,64	1530
кадмій	8,64	7,0	0,62	0,23	321
латунь Л68	8,5	7,0	1,0	0,38	900
мідь	8,7-8,9	1,58	3,9	0,39	1083
мідь кадмієва	8,9	2,1	2,7-3,5	0,39	-
молібден	10,2	4,5-5,0	1,46	0,272	262
нікель	8,8	7,2	0,7	0,46	1455
олово	7,3	11,0	0,64	0,23	232

Закінчення додатка Б

свинець	11,3	19,5	0,35	0,13	327
срібло	10,5	1,5	4,2	0,234	960
силумін	2,6	3,6	1,6	-	570
сталь	7,8	10-13	0,4	0,47	1300-1400
хром	7,1	14	0,5-0,7	0,43	1800
чугун	7,7	5,8	0,47	0,5	1200

Зміст

Вступ	3
1. Лабораторна робота 1.....	4
1.1 Порядок підготовки.....	4
1.2 Основні відомості.....	4
1.3 Дані для виконання роботи	6
1.4 Зміст звіту	7
Контрольні запитання	7
2. Лабораторна робота 2.....	7
2.1 Порядок підготовки.....	7
2.2 Основні відомості.....	7
Дані для виконання роботи.....	8
2.4 Зміст звіту.....	9
Контрольні запитання.....	10
3 Лабораторна робота 3.....	10
3.1 Порядок підготовки.....	10
3.2 Основні відомості.....	10
3.3 Дані для виконання роботи.....	12
3.4 Зміст звіту.....	12
Контрольні запитання.....	12
4 Лабораторна робота 4.....	13
4.1 Порядок підготовки.....	13
4.2 Основні відомості.....	13
4.3 Дані для виконання роботи.....	13
4.4 Зміст звіту.....	14
Контрольні запитання.....	15
5 Лабораторна робота №5.....	15

5.1 Порядок підготовки.....	15
5.2 Основні відомості.....	15
5.3 Дані для виконання роботи.....	15
5.4 Зміст звіту.....	16
Контрольні запитання.....	16
Список літератури.....	16
6. Додаток А. Приклади програм з розрахунку завдань лабораторних робіт у програмному пакеті MAPLE.....	17
7. Додаток Б. Питома вага, питомий опір, теплопровідність, теплоєм- ність, температура плавлення різних матеріалів.....	20

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Контактно-дугогасні системи та теплові процеси в електричних апаратах» для студентів спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка”, спеціалізацій 141.07 “Електричні апарати” та 141.08 “Електропобутова техніка” усіх форм навчання

Укладач ГРИЩУК Юрій Степанович

Відповідальний за випуск Б. В. Клименко

Роботу рекомендував до видання В. В. Воїнов

План 2018 р., поз. 81

Підп.до друку 27.08. 2018 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.

Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 1,4.

Наклад 50 прим. Зам. № Ціна договірна

Видавничий центр НТУ “ХПІ”. 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 27. 08. 2017 р.

Надруковано ТОВ “Золоті сторінки”, 61002, Харків,
вул. Маршала Бажанова, 28